

УДК 662.64

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УГЛЯ ТАЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

О.А. Казакова, А.С. Заворин, А.В. Казаков

Томский политехнический университет

E-mail: okazakova@tpu.ru

Выявлены закономерности преобразования компонентов минеральной части угля под действием факторов технологии сжигания на основе расчетной оценки параметров прогнозирования свойств минеральной части угля при его сжигании, полученной в итоге лабораторных исследований керновых проб, выработаны рекомендации по использованию таловского угля Томской области как топлива. Приведенные материалы представляют собой методическую базу для проектирования котельных агрегатов на таловском угле.

### Ключевые слова:

Уголь, минеральный состав, зола, сжигание, шлакование, отложения, загрязнение, температура газа, абразивность, топка.

### Key words:

Coal, mineral structure, kelp, ncineration, clinkering, adjournment, pollute, temperature of gas, abrasiveness, furnace.

### Введение

Таловское бурогоугольное месторождение Томской области в перспективе может стать альтернативным вариантом привозным углем. По энергетическим качествам этот уголь несколько уступает бурому углю Берёзовского месторождения известного Канско-Ачинского угольного бассейна на юге Красноярского края, а по себестоимости добычи, транспорта, переработки он окажется дешевле в 1,5...2 раза применительно к потреблению в пределах Томской области. Таловское месторождение оценивают как относительно крупное с прогнозными ресурсами около 3,6 млрд т. По прогнозным оценкам, добыча угля может составить 10...15 млн т в год [1]. На базе нового источника топлива предлагается строительство новой теплоэлектростанции в радиусе не более 5...10 км от первоочередного участка добычи угля (районы сел Наумовка, Георгиевка, Петропавловка). С учетом наличия сформированной инфраструктуры бывшего военного городка п. Итатка (ж/д и автодорога, ЛЭП, газ, жилые свободные дома) и наличия избытка рабочей силы возможен вариант размещения ТЭЦ в этом населенном пункте. Исходя из непростой схемы собственности на существующие энергообъекты, многолетних сложившихся схем поставок угля из других регионов, очевидных проблем с обратным переводом ТЭЦ-3 и ГРЭС-2 с газа на уголь, предполагается, что именно вариант со строительством новой теплоэлектростанции будет предпочтительным и первоочередным [2].

Допустимо рассматривать и другие пути использования бурого угля Таловского месторождения [3]. Однако, в любом случае принципы технологии и реализация конкретных конструктивных решений должны учитывать особенности минерального состава угля. С учетом обозначенной стратегии Координационного совета по ресурсной части ТЭК Межрегиональной ассоциации «Сибирское соглашение», заключающейся в строительстве новой теплоэлектростанции (условно назван-

ной ТЭЦ-4), в первую очередь необходима методическая база, пригодная для проектирования котельных агрегатов на таловском угле. Под таковой понимается дополнение существующих нормативных указаний [4, 5] отсутствующими в них данными и рекомендациями по новому углю.

### Исходные положения

Таловский уголь характеризуется по результатам исследования керновых проб широким диапазоном зольности. Это обусловило необходимость рассмотрения прогнозируемых при сжигании угля технологических параметров в зависимости от его зольности. Для этих целей выбраны следующие диапазоны зольности сухой массы ( $A^d$ ): 0...20; 20...30; 30...45 %.

Исходя из результатов выполненных исследований состава минеральной части применительно к каждому из диапазонов таловского угля [6], с высокой достоверностью можно полагать, что изложенное в работе [7] обобщение исследований канско-ачинских углей соотносится с таловским углем, хотя и выявляет существенные отличия. Наиболее важным из них является принадлежность как внутренней, так и внешней составляющей минеральной части к кислотному типу состава в каждом диапазоне зольности. При этом показатель кислотности для внутренней составляющей постоянен во всем диапазоне зольности, в то время как для внешней он возрастает. Такое свойство определяется значительным увеличением содержания  $SiO_2$  при неизменном содержании  $Al_2O_3$  и некоторым снижением  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  и  $MgO$  по мере прироста зольности.

Рассматривая процессы с участием компонентов внешней составляющей минеральной части угля при его сжигании, следует выделить преобразования глинистых минералов. Так, минералы каолиновой группы при 100...120 °C теряют абсорбционную воду. В интервале температур 550...600 °C происходит выделение кристаллизационной воды и разрушение кристаллической решетки с образо-

ванием метакриолита. В интервале температур 950...1200 °С метакриолит разлагается, образуя кристаллические силлиманит ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) и муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ). Монтмориллониты выделяют абсорбционную воду при 100...150 °С. При 850...900 °С происходит разрушение кристаллической решетки, а при 900...920 °С — образование новых кристаллических структур. Продуктами разложения монтмориллонитов являются двуокись кремния, кордиерит, энстатит, муллит и шпинель. С повышением температуры количество муллита увеличивается. Таким образом, объединяющей особенностью поведения глинистых минералов в составе угля является образование при нагреве в конечном итоге муллита.

Известно, что муллит и тем более кварц в составе продуктов сгорания угля являются носителями абразивных свойств золы [8]. Это определяет необходимость оценки параметров золового износа конвективных поверхностей нагрева и других элементов газового тракта, а также эффективности технических решений по его ограничению при проектировании котельной установки.

Вместе с тем, как и канско-ачинские угли, таловский содержит органо-минеральные комплексы, условия физико-химических превращений которых характеризуются высокой термодинамической вероятностью появления и существования золовых частиц, несущих легкоплавкие фазы соединений железа, а также реакционно-активные оксиды основных минералов [7]. Следуя известным схемам взаимодействий, инициируемых этими компонентами в продуктах сжигания углей [8], необходимо оценивать широкое разнообразие процессов, приводящих к образованию различных типов натрубных отложений, характерных для отдельных зон газового тракта котлов, работающих на твердом топливе.

Результаты исследования состава минеральной части таловского угля [6] позволяют выполнить расчетные оценки широкого спектра прогнозных параметров сжигания, используя методические рекомендации и другие работы [9–15].

#### Основные результаты и их обсуждение

Допустимая температура продуктов сгорания на выходе из топки лимитируется по условиям образования шлаковых отложений на поверхностях нагрева. В качестве определяющего параметра этих условий используют температуру начала шлакования  $t_{\text{шл}}$  [5]. Значения  $t_{\text{шл}}$ , определенные согласно [15] для выбранных диапазонов зольности угля (рис. 1), показывают закономерность её увеличения с возрастанием зольности (рис. 1, а), описываемую корреляционной зависимостью

$$t_{\text{шл}} = 0,05(A^d)^2 - 1,15(A^d) + 988,6.$$

Ввиду существенного различия составов и плотностей внутренней и внешней минеральной составляющих угля при его сжигании некоторая часть внешних минеральных компонентов может

сепарироваться в шлак, а уносимая газами летучая зола по составу — приближаться к внутренней золе топлива. Такое разделение, естественно, влияет на температуру начала шлакования, которая в предельном случае составит 962 °С (рис. 1б).

С учетом положения о том, что шлак образован минеральными компонентами внешней золы, по трехкомпонентной диаграмме для кислых шлаков определена температура нормального жидкого шлакоудаления  $t_{\text{нж}}$  (рис. 2). На рисунке приведена зависимость диапазонов температур нормального жидкого шлакоудаления от зольности исходного угля.

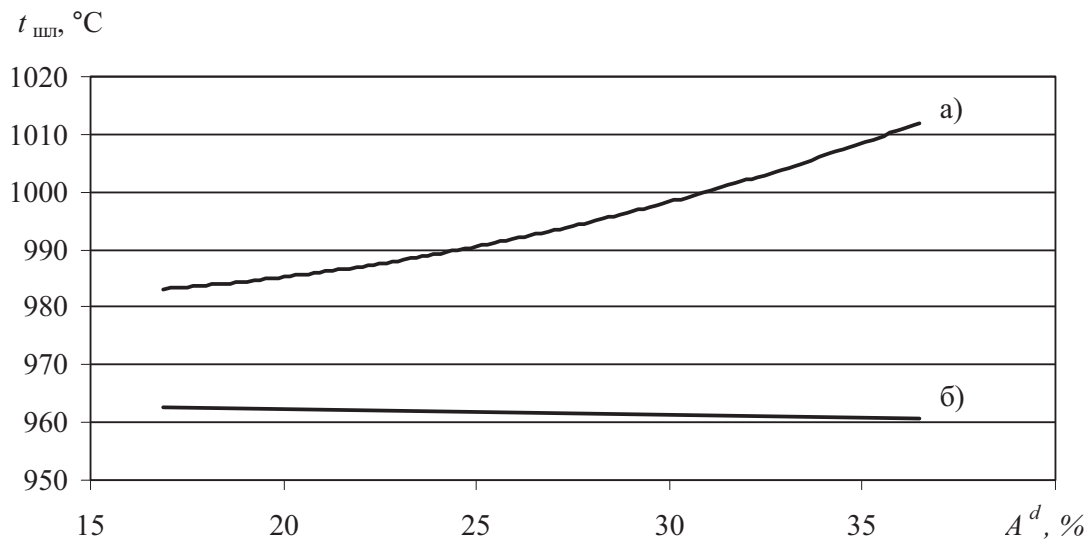
Если исходить из того положения, что в шлак будут сепарироваться только внешние минеральные компоненты угля, создающие кислотный состав шлаков, то определяемые по трехкомпонентной диаграмме значения температуры нормального жидкого шлакоудаления  $t_{\text{нж}}$  также представляют собой зависимость от зольности сжигаемого угля (рис. 2). Несмотря на то, что эта зависимость отражает предельное состояние шлакообразования, она характеризует шлаки от сжигания таловских углей как весьма тугоплавкие.

По известному химическому составу определены значения коэффициента абразивности золы, используемого для расчета абразивного износа труб конвективных поверхностей нагрева [5]:  $a = 0,045(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 44) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ . Результаты приведены на рис. 3 для общей массы золы (кривая 1) и золы от внутренней минеральной составляющей угля (кривая 2).

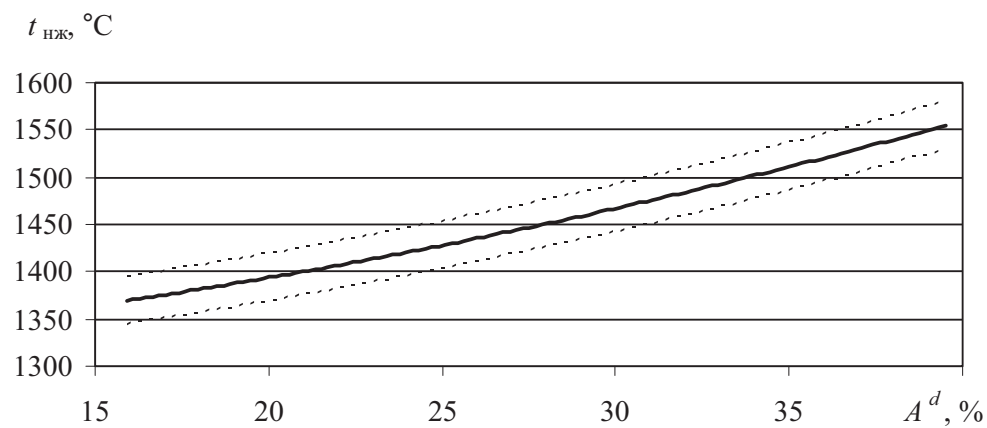
Из сравнения полученных значений коэффициента абразивности с известными данными для используемых тепловыми электростанциями углей можно констатировать, что в области кривой 1 будет наблюдаться повышенный золовой износ при сжигании таловского угля. В случае удовлетворительного отделения внутренней золы от внешней в топочном процессе можно добиться существенного снижения золового износа за счет уменьшения коэффициента абразивности летучей золы до значений, близких к области кривой 2, рис. 3.

Согласно методике оценки натрубных золовых отложений [10] химический состав золы характеризует возможные натрубные отложения как рыхлые во всем диапазоне зольности таловского угля. Тем не менее, продукты сжигания склонны к шлакованию топочной камеры и обнаруживают некоторую (не явно выраженную) склонность к заносу поверхностей нагрева по газовому тракту котла.

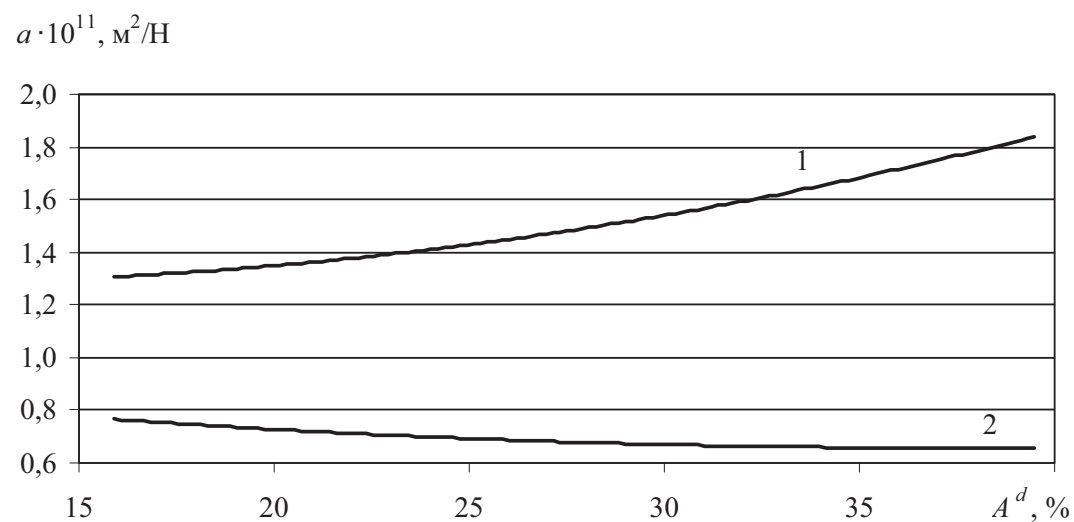
Используя методику УралВТИ [9, 11–15], получены расчетные оценки вероятности следующих процессов с участием золы: шлакования ширм; шлакования топки; образования железистых отложений на топочных экранах; образования сульфатно-кальциевых отложений на трубах конвективного пароперегревателя; загрязнения поверхностей конвективной шахты на базе активных щелочей (табл. 1).



**Рис. 1.** Зависимость температуры начала шлакования от зольности угля для химического состава золы: а) общей массы; б) внутренней минеральной составляющей угля



**Рис. 2.** Диапазон температуры нормального жидкого шлакоудаления в зависимости от зольности



**Рис. 3.** Изменение коэффициента абразивности золы от зольности угля: 1) для общей массы золы; 2) для золы от внутренней минеральной составляющей

**Таблица 1.** Прогнозируемая вероятность влияния минеральной части угля на работу котла

Тестируемые процессы	Диапазон зольности, $A^d$ , %		
	0...20	20...30	30...45
Шлакование топки	Высокая	Высокая	Средняя
Шлакование ширм	Высокая	Средняя	Средняя
Образование железистых отложений в топке	Высокая	Средняя	Низкая
Образование сульфатно-кальциевых отложений	Средняя	Низкая	Низкая
Загрязнение поверхностей конвективной шахты	Низкая	Низкая	Низкая

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют об убывании вероятности развития тестируемых процессов по мере увеличения зольности таловского угля. Это объясняется тем, что доминирующим компонентом минеральной части, повышающим зольность, является кремний в составе внешних минеральных включений. Увеличение его содержания в угле приводит, соответственно, к снижению доли реакционноактивных соединений кальция, железа, натрия и калия, что, в свою очередь, сказывается на загрязнении поверхностей нагрева. Кроме того, свободный оксид кремния связывает кальций в твердофазных реакциях, что также представляет собой позитивный фактор.

Полученные результаты позволяют задать основные расчетные параметры для котельного агрегата, проектируемого для сжигания таловского угля.

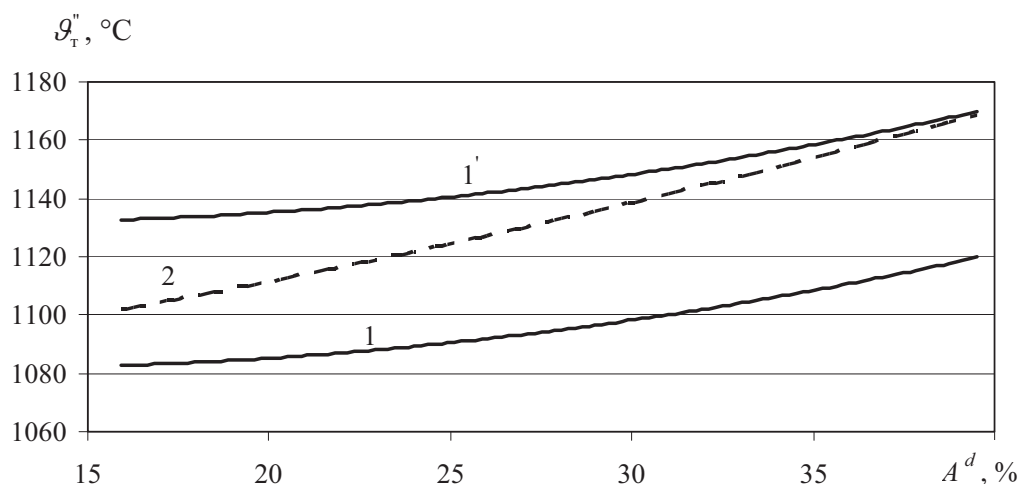
Одной из наиболее важных опорных точек при разработке тепловой схемы котла является температура газов на выходе из топки  $\vartheta_T''$ . Для её определения можно использовать два подхода. Первый базируется на значении температуры начала шлакования с учетом характера первичного слоя отложений [4]. В соответствии с этим для рыхлых отложений:  $\vartheta_T'' = t_{\text{шл}} + (100...150)$ , °С. Соответствующая зависи-

мость  $\vartheta_T''$  от зольности угля приведена на рис. 4 в виде диапазона, ограниченного кривыми 1 и 1' (соответственно  $\vartheta_T'' = t_{\text{шл}} + 100$  и  $\vartheta_T'' = t_{\text{шл}} + 150$ ). Другой подход представляет собой расчетная оценка по методике УралВТИ [12], согласно которой в том же интервале зольности  $\vartheta_T''$  изменяется от 1100 до 1170 °С (рис. 4, кривая 2). Удовлетворительная сходимость результатов, полученных по разным методам, свидетельствует о достаточной надежности оценки температуры на выходе их топки.

Результаты, приведенные выше, а также опубликованных ранее [3, 6] исследований таловского угля и его золы, необходимые для выполнения теплового расчета котлов, обобщены в табулированном формате Нормативного метода [5], табл. 2, 3. Совокупность этих данных позволяет заключить, что оптимальным является использование топок с твердым шлакоудалением, что к тому же позволит за счет более низкой температуры в зоне активного горения минимизировать шлакование топочной камеры.

Расчетная температура в конце зоны активного горения  $\vartheta_{a.g.}''$ , определяемая согласно рекомендациям [4], оценивается на уровне 1115 °С. Поскольку  $\vartheta_{a.g.}'' > t_{\text{шл}}$ , требуются конструктивные меры по снижению температуры вблизи экранов в зоне активного горения, в качестве которых можно рассматривать ввод рециркулирующих газов через специально ориентированные каналы горелок или отдельные сопла.

С учетом предложенного способа шлакоудаления и других технологических параметров сжигания таловского угля рекомендуемые характеристики камерных топок — допустимое тепловое напряжение поперечного сечения топки  $[q_f]$ , допустимое тепловое напряжение лучевоспринимающей поверхности зоны активного горения  $[q_{a.g.}]$  и средние температуры газов перед ширмовым  $\vartheta_{\text{шп}}''$  и конвективным пароперегревателями  $\vartheta_{\text{кпп}}''$  — приведены в табл. 4.



**Рис. 4.** Зависимость температуры газов на выходе из топки от зольности, определенные по: 1, 1') температуре начала шлакования, минимальные и максимальные значения; 2) методике УралВТИ

**Таблица 2.** Расчетные характеристики топлива

Диапазон зольности, $A^d$ , %	Рабочая масса топлива, %							Теплота сгорания, МДж/кг		Предельные значения, %		Приведенные значения, %кг/МДж		Выход летучих, %
	$W_i^r$	$A^r$	$S^r$	$C^r$	$H^r$	$N^r$	$O^r$	$Q_i^r$	$Q_d^r$	$W_i^r$	$A^d$	$r_{пр}$	$A'_{пр}$	$V^{daf}$
0...20	43,9	9,5	0,3	30,1	2,3	0,5	13,4	10,3	18,4	62,3	16,9	17,8	3,8	58,4
20...30	40,7	14,6	0,2	29,5	2,2	0,6	12,2	10,0	16,9	59,6	24,6	17,0	6,1	59,8
30...45	39,1	22,2	0,2	26,3	1,4	0,6	10,2	7,9	12,9	56,9	36,5	20,8	11,8	60,9

**Таблица 3.** Состав, характеристики плавкости и шлакуемости золы топлива

Диапазон зольности $A^d$ , %	Температуры плавкости золы, °С			Начало нормального жидкого шлакоудаления	Состав золы на бессольфатную массу, %								Температура начала шлакования $t_{шл}$ , °С
	$t_A$	$t_B$	$t_C$	$t_{н.ж}$ , °С	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	
0...20	1185	1290	1375	1375	46,9	25,3	1,7	10,0	13,0	1,6	0,9	0,6	
20...30	1210	1300	1380	1425	46,9	24,6	1,9	12,2	12,0	1,2	0,8	0,5	
30...45	1260	1350	1395	1525	59,2	21,2	2,1	7,4	7,1	1,1	1,4	0,6	

**Таблица 4.** Расчетные характеристики камерных топок

$A^d$ , %	$[q_d]$ , МВт/м <sup>2</sup>	$[q_{л.г.}]$ , МВт/м <sup>2</sup>	Характер первичных отложений	$\theta_{шпл}$ , °С	$\theta_{кпл}$ , °С	Склонность к образованию прочных первичных отложений
0...20	4,0	0,7	рыхлые	1108	958	нет
20...30	4,9	0,9		1115	965	
30...45	6,6	1,1		1137	987	

Повышенные допустимые значения температуры газов перед ширмовыми пакетами пароперегревателя по сравнению с температурой начала шлакования на данном этапе разработки проблемы представляются обоснованными с позиции свойств первичного слоя, который прогнозируется рыхлым и медленно упрочняющимся во всем диапазоне зольности угля. Это позволит, не предусматривая принудительных мер снижения температуры газов на выходе из топки, обеспечить высокий температурный напор конвективного теплообмена для пароперегревателя, однако потребует в превентивном порядке оборудовать его штатными средствами очистки поверхностей нагрева в ходе работы котла.

#### Выводы

- По результатам исследования теплотехнических характеристик и свойств минеральной части угля Таловского месторождения (Томская область) получены оценки основных технологических параметров котельных агрегатов для его энергетического сжигания:

- температура начала шлакования поверхностей нагрева;
- температура нормального жидкого шлакоудаления;
- значение коэффициента абразивности золы;
- прогноз шлакования топки и ширм, образования железистых и сульфатно-кальциевых отложений, загрязнения поверхностей конвективной шахты;
- температура газов на выходе из топки;
- допустимое тепловое напряжение поперечного сечения топки;
- допустимое тепловое напряжение лучевопринимавшей поверхности зоны активного горения;
- средние температуры газов перед ширмовым и конвективным пароперегревателями.

- Полученные оценки технологических параметров котельных агрегатов носят справочный характер, соответствуют положениям нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов и пригодны для их проектирования на таловском угле.
- Для проектирования паровых котлов, работающих на угле Таловского месторождения, рекомендуется способ сжигания топлива в пылеугольном факеле в камерной топке с твердым шлакоудалением, успешность реализации которого зависит от полноты информации о диапазоне зольности поставляемого угля.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 17. – С. 63–65.
- Паровинчак М.С., Смолянинова Н.М. Пути оптимизации топливно-энергетического баланса (ТЭБ) сибирских регионов на примере Томской области // В сб. матер. Координационного совета по ресурсной части ТЭК Межрегиональной ассоциации «Сибирское соглашение», г. Томск, декабрь 2005 г. – Томск: МАСС, 2005. – С. 86–92.
- Заворин А.С., Карякин С.К., Маслов С.Г. и др. Теплотехнические свойства углей Таловского месторождения Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 131–136.
- Вербовецкий Э.Х., Жмерик Н.Г. и др. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. – СПб.: ВТИ-ЦКТИ, 1996. – 270 с.
- Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и дополненное. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.



6. Казакова О.А., Заворин А.С., Казаков А.В. Состав неорганической части угля Таловского месторождения Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 49–52.
7. Заворин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей (теплотехнический аспект). – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997. – 187 с.
8. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 144–150.
9. Алехнович А.Н., Дик Э.П. Методические рекомендации по исследованию шлакующих и загрязняющих свойств углей. – Челябинск: Урал ВТИ, 1998. – 66 с.
10. Белов С.Ю., Рундыгин Ю.А. Прогноз склонности твердого топлива к загрязнению поверхностей нагрева парогенераторов связанными отложениями // В сб.: Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. – Таллин, 1980. – Т. А. – С. 145–150.
11. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Температурные условия начала шлакования при сжигании углей с кислым составом золы // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 34–38.
12. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Выбор температуры газов на выходе из топки по условиям шлакования // Теплоэнергетика. – 1994. – № 8. – С. 23–26.
13. Алехнович А.Н., Гладков В.Е., Богомолов В.В. Прогнозирование шлакования по химическому составу частичек летучей золы // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 23–28.
14. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Прогнозирование шлакующих и загрязняющих свойств углей по широкодоступным сведениям и результатам специальных исследований // В сб. докл.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов. – Т. 1. – Челябинск: Изд-во УралВТИ, 1996. – С. 61–78.
15. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е., Артемьева Н.В. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // Теплоэнергетика. – 1997. – № 3. – С. 64–68.

Поступила 29.06.2011 г.

УДК 621.181:519.876

## АНАЛИЗ ТОПОЧНОЙ СРЕДЫ КОТЛА БКЗ-210-140 НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Заворин, Т.М. Бетхер, Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет  
E-mail: betkher.tm@gmail.com

*Выполнено математическое моделирование топочной среды котла БКЗ-210-140 при сжигании непроектных марок углей. Получено соответствие результатов математического моделирования с расчетными и экспериментальными данными. Доказана адекватность математической модели, используемой в программном продукте FIRE 3D, применительно к пылеугольной технологии сжигания в топке с тангенциальной компоновкой горелок.*

### Ключевые слова:

Математическое моделирование, пакет прикладных программ, котел, концентрация кислорода, скорость аэросмеси, коэффициент избытка воздуха, температура дымовых газов.

### Key words:

Mathematical modeling, package of applied programs, boiler, concentration of oxygen, speed of an aeromix, factor of surplus of air, temperature of smoke gases.

В последние годы при проектировании, исследовании и наладке котельного оборудования все более широко применяется математическое моделирование, основанное на физических законах, описывающих процессы аэродинамики и теплообмена [1, 2]. Компьютерное моделирование позволяет корректно изучить режимы работы и оптимизировать как вновь проектируемое, так и реконструируемое оборудование. Совместное использование математического моделирования, физического эксперимента и натурных испытаний дает возможность получить наиболее полную и достоверную информацию об объекте исследования. При этом существенно сокращаются затраты на проведение экспериментальных и опытных работ.

Целью данного исследования является апробация пакета прикладных программ FIRE 3D для котельного агрегата, реализующего тангенциально закрученную аэродинамику пылеугольного факела в топочной камере.

В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат БКЗ-210-140Ф, который является одним из наиболее распространенных в России котлов для ТЭЦ (по данным завода-изготовителя, в период с 1960 по 1985 гг. выпущено около 220 котлов такого типа).

Топочная камера, имеющая в плане форму, близкую к квадрату, с размерами по осям экранных труб 7424×7808 мм, экранирована трубами диаметром 60 мм, расположенными с шагом 64 мм. Камера оборудована четырьмя прямоточными горелками, установленными в углах топки тангенциально к окружности диаметром 900 мм, расположенной по оси симметрии топки.

В качестве инструмента исследования применен пакет прикладных программ FIRE 3D, который позволяет производить расчет пространственной аэродинамики с учетом переноса тепла конвекцией и излучением при горении полидисперсного пылеугольного топлива в камерах сгорания